



## PRC梁の静的・動的耐荷性状に関する実験的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2007-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): PRC beam, static capacity, impact loading, absorption energy 作成者: 岸, 徳光, 竹本, 伸一, 三上, 浩, 小室, 雅人, 松岡, 健一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/186">http://hdl.handle.net/10258/186</a>

## PRC梁の静的・動的耐荷性状に関する実験的研究

その他（別言語等） のタイトル	Experimental Study on Static and Dynamic Behavior of PRC Beams
著者	岸 徳光, 竹本 伸一, 三上 浩, 小室 雅人, 松岡 健一
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	47
ページ	45-56
発行年	1997-11-28
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/186">http://hdl.handle.net/10258/186</a>

# PRC梁の静的・動的耐荷性状に関する実験的研究

岸 徳光\*<sup>1</sup>, 竹本 伸一\*<sup>2</sup>, 三上 浩\*<sup>3</sup>  
小室 雅人\*<sup>1</sup>, 松岡 健一\*<sup>1</sup>

## Experimental Study on Static and Dynamic Behavior of PRC Beams

Norimitsu KISHI, Shin-ichi TAKEMOTO, Hiroshi MIKAMI,  
Masato KOMURO and Ken-ichi MATSUOKA

(原稿受付日 平成9年5月9日 論文受理日 平成9年8月20日)

### Abstract

In this paper, in order to accumulate the basic data for establishing a rational anti-impact design procedure of PC ( Prestressed Concrete ) members in PC rock-sheds, static and impact tests were conducted for six types of PRC ( Prestressed Reinforced Concrete ) rectangular beams, in which number of PC strands, tensioning ratio per one PC strand and volume of rebars for cracks controlling were taken as variable parameters. The results obtained from these experiments are as follows: 1) letting tensioning ratio be 50 % and number of PC strands be twice than those of conventional design, static capacity and absorbed energy can be 1.7 times and a little less than 3 times increased, respectively; 2) arranging deformed rebars at the lower area of beam, absorbing capacity of energy can be improved; and 3) anti-impact resistance of PC beams can be effectively improved by decreasing tensioning ratio of PC strands, increasing number of PC strands and/or arranging deformed rebars.

Key Words: PRC beam, static capacity, impact loading, absorption energy

### 1. はじめに

我国の山岳あるいは急崖斜面が海岸まで迫っている地域の道路上には、落石に対する安全性確保のために落石覆工が設けられている。落石覆工の多くは、RC(鉄筋コンクリート)製あるいはPC(プレストレストコンクリート)製である。通常、前者は現場施工型で、12 mを1ブロックとし谷(海)側を柱形式あるいは窓形式にするラーメン構造となっている。後者は工場製作した梁や柱等の各構成部材を現場で組み立てる工法であり、現在は2ヒンジ1剛結接合逆L型構造が一般的である。PC製は、品質管理も良く、将来予想される労働者不足の解

消や工期短縮を計ることが可能であることより、今後ますます需要が増えるものと予想される。

しかしながら、平成元年7月には一般国道305号線福井県越前海岸における岩盤崩落によってPC覆工が倒壊され、また平成8年2月には一般国道229号線北海道豊浜トンネル上の岩盤崩落によって、トンネルやトンネル巻き出し部(覆工)が破壊された。このように、道路周辺地山の経年変化によって落石規模が設計時より大きくなり、設計荷重の見直しを迫られる箇所が今後多くなるものと予想される。

ライフラインとしての道路を落石による災害から守るためには、緩衝性能や荷重分散性に優れた緩衝構造の開発と同時に、耐衝撃性に優れかつ安全余裕度の大きな構造部材の設計手法開発が肝要であるものと判断される。幸い、計測技術の進歩やエンジニアリングワークステーションの普及により、RC/PC部材の耐衝撃性や覆工構造物の合理的な設計手法開発に関する実験的・数値解析

\*1 建設システム工学科

\*2 ドーピー建設工業(株)

\*3 三井建設(株)

表-1 試験体一覧

試験体名	PC 鋼材 緊張率	PC 鋼材 本数	異形鉄 筋本数	有効張緊 力 (tf/本)	全有効張 力 (tf)
P-1.0-3	1.0	3	-	5.43	16.28
P-0.5-3	0.5	3	-	2.61	7.82
P-0.5-6	0.5	6	-	2.78	16.70
P-0.25-6	0.25	6	-	1.34	7.98
P-1.0-3-R1	1.0	3	D10×2	5.44	16.34
P-1.0-3-R2	1.0	3	D13×3	5.46	16.46

使用状態における許容緊張力 : 5.88 tf

的研究が盛んに行われるようになってきた。

PC 部材に限定すると、建設省土木研究所では RC 構造が PC 構造よりも耐衝撃性に優れているとして、RC 構造と PC 構造の特徴を利用した PRC 製覆工に関する研究を行っている<sup>(1)</sup>。著者等も、覆工構造物に適用するための緩衝材の開発<sup>(2), (3)</sup>や5連から成る実規模 PC 覆工模型を用い、緩衝材の性能評価を含めた PC 覆工の設計レベルにおける重錘落下衝撃実験を行っている<sup>(4)</sup>。

また、通常の PC 部材はその設計が PC 鋼材の降伏応力の 80 % 以上のプレストレスを導入することを前提としている。これより、PC 部材の残存耐力は小さく、従って終局吸収エネルギー量も小さくなるものと考えられる。著者等はこの点に着目し、PC 鋼材の緊張率を小さくすることにより PC 部材の残存耐力や吸収エネルギー量を増大させることに関する数値解析的検討も行っている<sup>(5)</sup>。

特に、落石覆工のように死荷重による断面力比率が 0.2 ~ 0.3 程度と衝撃荷重のそれに比して小さく、かつ衝撃荷重の不確定性が大きい場合には、従来からの力を基本とする設計思想にエネルギー論的な考え方を導入し、エネルギー吸収容量を大きくすることによって衝撃荷重に対する安全余裕度の高い断面設計が可能になるものと判断される。

このような観点より、本研究では耐衝撃性に優れた PC (PRC) 部材の断面設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、PC 鋼材の緊張率やひびわれ制御のための異形鉄筋量を変化させた 6 種類の矩形 PRC 梁 (ひびわれ制御用鉄筋を導入したプレレストコンクリート梁) を用いた静載荷および重錘落下衝撃実験を行った。

なお、本実験では全ての PC 梁にひびわれ制御用の異形鉄筋を導入していないが、煩雑さを避けるためこれらを総称して PRC 梁と呼ぶこととする。また、本実験

は全て平成 7 年度に室蘭工業大学に設置された「構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置」を用いて行われた。

## 2. 実験概要

### 2.1 構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置

本試験装置は、1) 各種 RC/PC 部材 (梁, 版, 柱) や新素材を用いた機械要素、鋼骨組構造の耐衝撃/耐荷性に関する研究、2) 各種構造部材の耐衝撃耐震補強法に関する研究、3) 衝撃荷重による地盤改良法に関する研究、4) 杭の動的貫入機構解明に関する研究プロジェクト等の推進のために、平成 7 年度に室蘭工業大学に設置されたものである。

本試験装置の仕様は以下のようである。

- 重錘落下装置 : 最大昇降範囲 3 m,  
リニアレールを用いた自由落下方式
- 重錘落下高さ : 最大 7 m
- 載荷速度 : 最大約 12 m/sec
- 重錘重量 : 最大 400 kgf
- 静的載荷装置 : 最大 100 tf, 最大昇降範囲 2 m,  
最大水平移動距離 4 m
- 供試体寸法 : 最大長さ 4.5 m, 最大幅 2.8 m,  
最大高さ 約 3.5 m

なお、本試験装置は重錘落下衝撃実験後に静載荷実験を行って、静的な残存耐力の確認も容易に行うことが可能である。

### 2.2 試験体および実験方法

各 PRC 梁はプレテンション方式で製作した。用いた緊張材は、PC 鋼より線 SWPR-7A 9.3 mm (公称断面積 51.61 mm<sup>2</sup>) である。その特性は、公称引張荷重、降伏点荷重がそれぞれ 9.06 tf, 7.70 tf であり、使用状態における許容緊張力は 5.88 tf である。

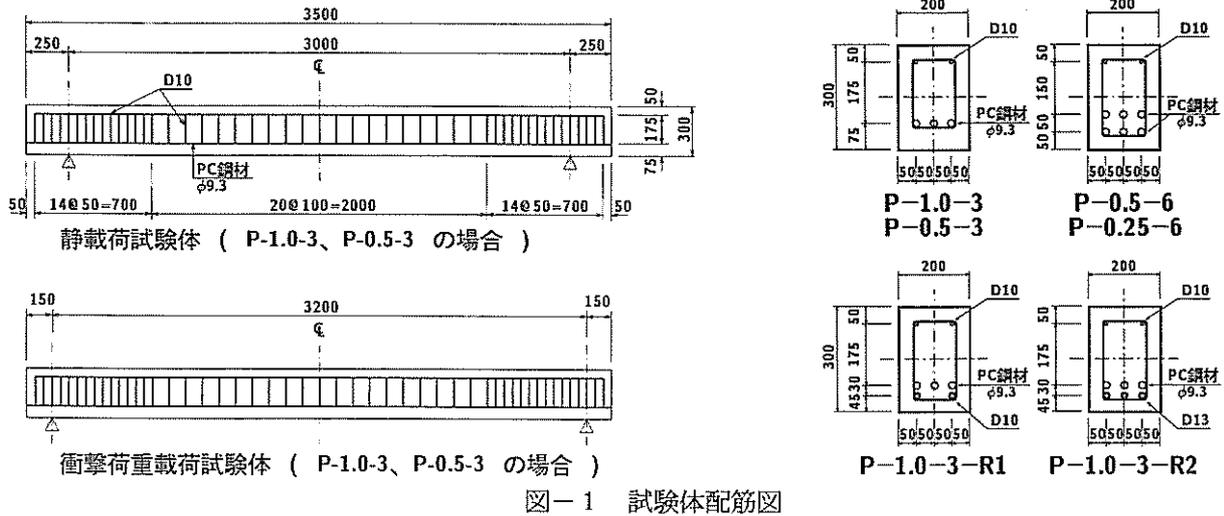


図-1 試験体配筋図

表-2 断面分割法を用いた静載荷時の諸特性に関する計算結果

試験体名	総緊張力 (tf)	初期上縁ひずみ ( $\mu$ )	初期下縁ひずみ ( $\mu$ )	下縁コンクリートひびわれ発生時荷重 (tf)	下縁鋼材降伏時荷重 (tf)	終局時荷重 (tf)
P-1.0-3	16.28	26	-132	4.44	6.19	7.19
P-0.5-3	7.82	13	-63	2.93	6.28	7.24
P-0.5-6	16.70	26	-133	4.56	11.29	13.33
P-0.25-6	7.98	13	-63	3.05	11.05	13.25
P-1.0-3-R1	16.34	25	-129	4.51	6.60	8.59
P-1.0-3-R2	16.46	24	-126	4.56	8.59	10.67

本実験に用いた試験体およびその特性値の一覧を表-1に示している。試験体はPC鋼材の有効緊張率（以下、単に緊張率と呼ぶ）、PC鋼材本数、ひびわれ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全6種類12体（静載荷実験、重錘落下衝撃実験各1体）である。なお、PC鋼材の緊張率（使用状態における許容緊張力 5.88 tf に対する）はラウンドナンバーで表し、補強筋量 D10×2、D13×3 をそれぞれ R1、R2 としている。また、実験に使用した異形鉄筋は全て SD295 である。

図-1 に試験体の配筋図を示している。コンクリートは実験時の平均圧縮強度が 663 kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数が 3.27×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup> である。実験はコンクリート打設後 37～46 日経過後に行っている。支点部には静載荷実験、重錘落下衝撃実験とも同様の原理で作製された治具を用いている。すなわち、梁を支点反力測定用ロードセルを介して鋼製のピンを用いて単純支持した。ただし、重錘落下衝撃実験の場合には衝撃荷重載荷による端部の跳ね上がりが大きくなるものと予想されたため、静載荷実験

の場合よりも大型の治具を用いることとした。各実験の概要は以下のとおりである。

静載荷実験：純スパンを 3 m とし、スパン中央部に 50 mm 径の鋼棒を半割にした載荷治具を設置して断面方向に線荷重、軸方向に集中荷重状態となるようにして油圧ジャッキにより加圧した。測定項目は荷重及び各点の変位である。実験終了後には各梁に発生したひびわれ状態も記録している。表-2 には、上述の物性値を考慮した断面分割法による初期の上下縁歪および各段階の荷重値を一覧にして示している。なお、断面方向の分割数は 60 とし、コンクリート、異形鉄筋、PC鋼材の応力-歪関係は土木学会コンクリート標準示方書に基づいて評価している。写真-1 は静載荷実験状況である。

衝撃荷重載荷実験：純スパンを 3.2 m（支点治具固定台の制約により、純スパンが静載荷実験の場合より 20 cm 長い）として行った。衝撃荷重は円柱状のロードセル付鋼製重錘（重量 300 kgf、載荷点部直径 20 cm、2 mm のテーパ付）を所定の高さにセットして梁中央部に

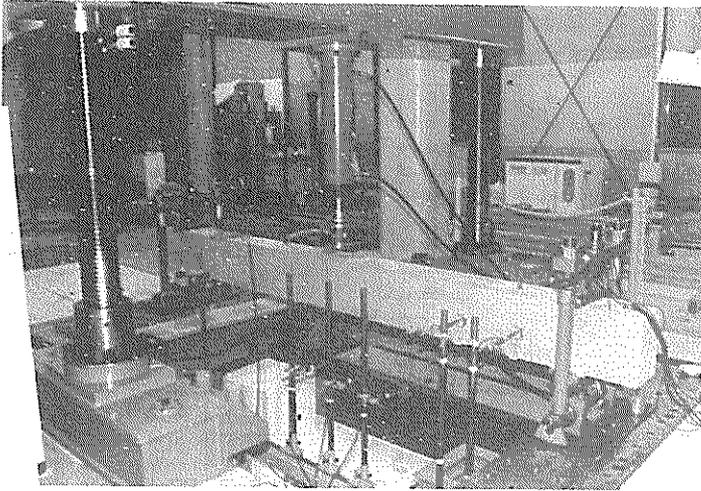


写真-1 静載荷実験状況

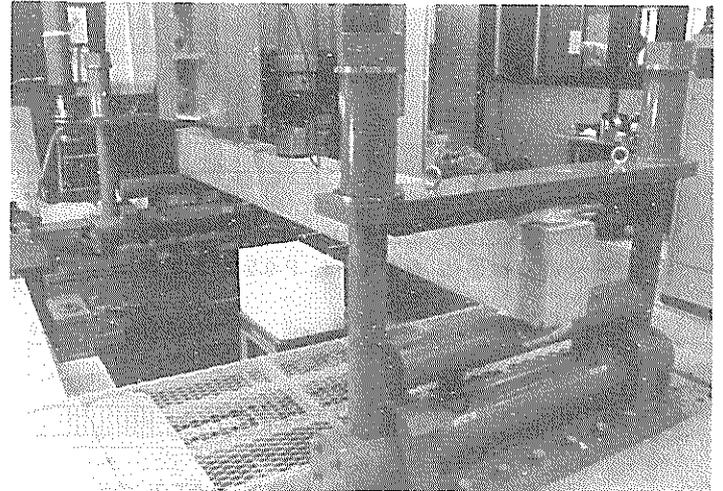


写真-2 衝撃載荷実験状況

自由落下させることにより載荷している。載荷実験は載荷速度  $V = 1 \text{ m/sec}$  から  $1 \text{ m/sec}$  ずつ破壊に至るまで増加させる繰り返し荷重載荷とした。測定項目は重錘衝撃力、支点反力、変位波形である。各波形は高帯域用のデータレコーダで一括収録し、 $50 \mu\text{sec}$  の時間間隔で  $100 \text{ msec}$  だけ A/D 変換している。各波形データは、A/D 変換後  $1 \text{ msec}$  の矩形移動平均法 ( $1 \text{ kHz}$  のローパスフィルター処理に相当) による平滑化が施されている。なお、梁破壊の基準として、当初最大残留変位が純スパンの  $2\%$  を越えた状態を設定したが、いずれの梁においても基準値に達する前に梁上端部が圧壊し、コンクリートが剝離した状態となったため、この時点を終極段階とした。全ての梁の最終載荷速度は  $V = 7 \text{ m/sec}$  である。写真-2 は衝撃荷重載荷実験状況である。

表-3 実験結果の比較

試験体名	実験結果				解析結果
	Pcr (tf)	Py (tf)	Pu (tf)	E (tf·cm)	Ea (tf·cm)
P-1.0-3	4.80 (1.00)	6.77 (1.00)	8.80 (1.00)	31.05 (1.00)	13.33 (1.00)
P-0.5-3	3.52 (0.73)	7.25 (1.07)	8.74 (0.99)	46.24 (1.49)	16.58 (1.24)
P-0.5-6	5.01 (1.04)	12.80 (1.89)	15.47 (1.76)	89.05 (2.87)	22.69 (1.70)
P-0.25-6	3.73 (0.78)	11.68 (1.73)	14.19 (1.61)	59.54 (1.92)	25.11 (1.88)
P-1.0-3-R1	5.54 (1.15)	7.57 (1.12)	10.40 (1.18)	44.65 (1.44)	13.74 (1.03)
P-1.0-3-R2	5.33 (1.11)	10.13 (1.50)	11.09 (1.26)	66.95 (2.16)	14.13 (1.06)

### 3. 静載荷実験結果と考察

#### 3.1 静載荷時の耐力およびエネルギー吸収能

表-3 には、実験結果の荷重-変位曲線の変曲点より求めたひびわれ発生時の荷重 (Pcr)、下端鋼材 (-R1, -R2 は鉄筋、それ以外の梁は PC 鋼材) の降伏時の荷重 (Py)、終局荷重 (Pu) 及びエネルギー吸収量 (E) と、参考のために断面分割法によって得られた荷重-変位曲線において最大荷重状態で残留変位するものと仮定した場合のエネルギー吸収量 (Ea) を一覧に示している。比較を容易にするために、各項目に関し P-1.0-3 の値に対する無次元化した値を ( ) で示している。なお、エネルギー吸収量 (E) は載荷荷重と載荷点変位による荷重-変位曲線によって囲まれた面積を用いて評価することとした。また、断面分割法を用いたエネルギー吸収量の算定において、載荷点変位はスパン方向の分割数に大きく影響される。本研究では、各梁間のエネルギー吸収能に関する

概略的な特性比較を行うことを目的としていることより、載荷点変位はスパン方向に  $20$  分割 (一要素の長さが桁高の  $1/2$ ) し、曲率の線形変化を仮定して一義的に算定している。従って、エネルギー吸収量に関する実験結果との差異は最大  $4.7$  倍、最小  $2.3$  倍程度となっている。

図-2 には各組合せに対する梁の荷重-変位曲線を比較して示している。以下、表-3、図-2 を用いて各組合せ毎に考察を行う。

#### (1) P-1.0-3, P-0.5-3 の比較 (図-2 a)

P-0.5-3 の場合には PC 鋼材の緊張率を  $50\%$  としていることより、Pcr が P-1.0-3 に比較して  $70\%$  程度に低減するものの、Pu は両者ほぼ等しく、エネルギー吸収量は逆に  $1.5$  倍の大きさになっている。なお、実験結果のエネルギー吸収量の増加割合は解析結果より  $25\%$  程度大きく示されている。これより、PC 鋼材量が同一の場合には、PC 鋼材の緊張率を低減することによって、Pu を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を増加させること

が可能であることがわかる。また、実PC覆工の場合における死荷重の全荷重に対する断面力の比率が 0.2~0.3 程度であることより、PC 鋼材の緊張率が 50 % 程度の場合には、死荷重に対しては、未だ全断面圧縮状態の設計が可能であるものと推察される。

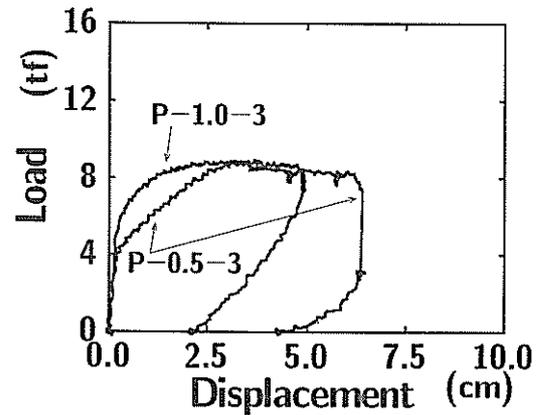
(2) P-1.0-3, P-1.0-3-R1, P-1.0-3-R2の比較 (図-2b)

P-1.0-3-R1, -R2 は異形鉄筋を下端に配置することにより、P-1.0-3 に対して  $P_{cr}$  が 11 ~ 15 % 程度、また  $P_u$  が 18 ~ 26 % 程度向上している。一方、エネルギー吸収量に関しては、解析結果では数 % 程度向上するのみであるが、実験結果では 44 %, 116 % と鉄筋量の増加に対応して大きく示されている。これより、下端に異形鉄筋を配置し PRC 梁にすることにより、 $P_u$  は勿論のことエネルギー吸収能も大きく向上することがわかる。また、P-0.5-3 も考慮に入れて比較すると、実験結果では P-0.5-3 と P-1.0-3-R1 のエネルギー吸収量がほぼ同程度になっている。これより、エネルギー吸収能の観点から考察すると、P-0.5-3 は使用鋼材量からも効率のよい PC 梁であることがわかる。

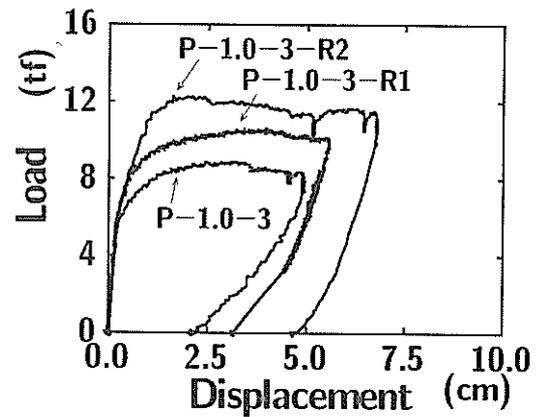
(3) P-1.0-3, P-0.5-3, P-0.5-6, P-0.25-6の比較

(図-2c)

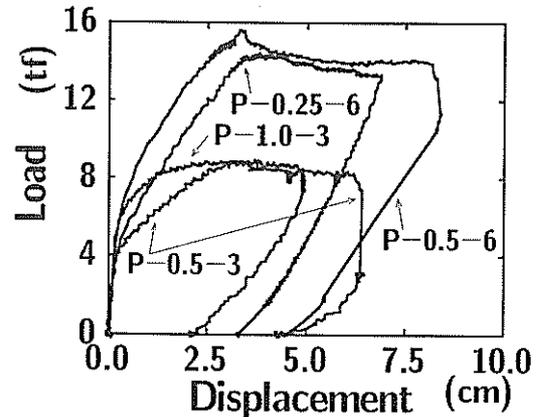
まず、PC 鋼材の全緊張力が等しい P-1.0-3 と P-0.5-6 の実験結果を比較する。P-0.5-6 の場合は P-1.0-3 に対して  $P_{cr}$  がほぼ等しいが、 $P_y$ ,  $P_u$  がそれぞれ 80 %, 70 % 以上大きい値を示している。また、エネルギー吸収量は解析結果が 70 % 程度の増大となっているが、実験結果は 3 倍弱の値となっている。これより、PC 鋼材の全緊張力を一定にし、緊張率を 50 %, 鋼材量を 2 倍にすることにより、静的耐力、エネルギー吸収能とも飛躍的に向上させることが可能であることがわかる。P-0.5-3 と P-0.25-6 の場合について同様の比較を行うと、P-0.25-6 は P-0.5-3 に対して、 $P_y$ ,  $P_u$  が 60 % 程度大きい値を示しているが、エネルギー吸収量は 30 % 前後と P-0.5-6 の場合よりも増加率が小さい。これは、P-0.25-6 の場合には 1 本あたりの導入プレストレス量が少ないため初期の段階より変形量が大きく、上段に配置された PC 鋼材がエネルギー吸収に十分寄与しない状態で梁上端部圧壊により終局に至ったためと推察される。P-0.5-6 と P-0.25-6 の実験結果を比較すると、P-0.5-6 の場合は全ての項目に関して P-0.25-6 より大きな値を示している。ただし、解析結果のエネルギー吸収量は P-0.25-6 が P-0.5-6 よりも若干大きなものとなっている。このような結果も、上述と同様 P-0.25-6 の上段の PC 鋼材がエネルギー吸収に効率的に寄与していない状態で梁上端部圧壊により終局に至ったためと考えられる。



(a)



(b)



(c)

図-2 各梁に関する荷重-変位曲線図の比較

3.2 静載荷時のひびわれ状況

図-3に各 PRC 梁の静載荷実験終了後のひびわれ図を一覧にして示している。前述のように、いずれの梁も下縁に曲げひびわれ発生後、上端載荷点部の圧壊により破壊に至った状況が示されている。

P-1.0-3, P-1.0-3-R1, -R2 を比較すると、下端に異形

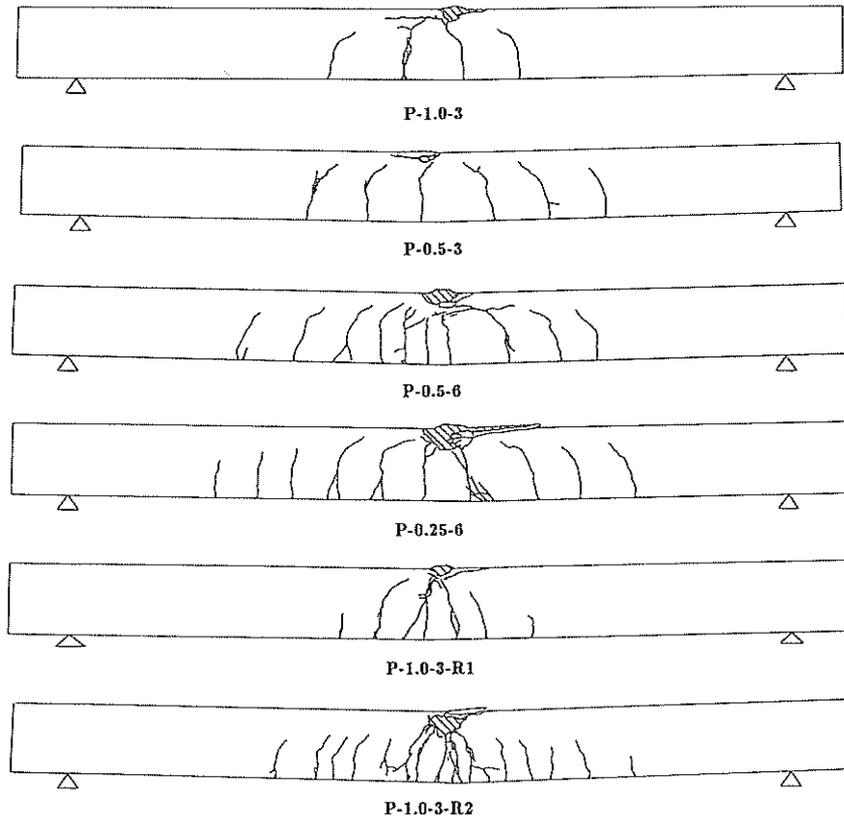


図-3 静載荷時の各 PRC 梁のひびわれ状況図

鉄筋を配置していない P-1.0-3 のひびわれ本数が最も少なく、-R1、-R2の順に多く示されている。特に-R2の場合は、ひびわれの分散、発生領域も改善されており、鋼材比の増加によってその効果が明確に示されていることがわかる。

P-1.0-3、P-0.5-3、P-0.25-6 を比較すると、緊張率が小さくなるとともにひびわれ発生領域が拡大していることがわかる。これは、緊張力の低下とともに、ひびわれ発生時の荷重が小さくなることに対応している。P-0.5-3と P-0.5-6 を比較すると、-6 の方が若干ひびわれの分散性が改善されているようである。一般にエネルギー吸収量を増加させるためには、ひびわれをできるだけ広い領域に分散分布させ、かつ梁全体の剛性を同程度に低減させることが重要であると考えられる。この考え方に従えば、P-0.5-6、P-0.25-6、P-1.0-3-R2、P-0.5-3 が他に比較してひびわれの分散性もよく、エネルギー吸収量も大きいものと判断される。この結果は前項で考察した結果とよく対応していることがわかる。

#### 4. 重錘落下衝撃実験結果と考察

##### 4.1 重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位の時間的な挙動性状

図-4には、代表的な4つの PRC 梁 ( P-1.0-3、P-0.5-3、P-0.5-6、P-1.0-3-R1 ) の重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位 ( 図中、それぞれ Impact Force、Reac. Force、Disp. で表示 ) の載荷速度  $V = 1, 3, 5, 7$  m/sec における時系列分布を示している。図中、P-1.0-3-R1 の載荷速度  $V = 5$  m/sec における載荷点変位はコンクリート破片の飛散により測定不可能になったため、隣近する測点 ( 載荷点から 15 cm 離れた点 ) の波形で代用している。図より、各応答波形は緊張率、PC 鋼材本数や異形鉄筋の有無に関わらず各載荷速度毎大略類似の応答分布を示していることがわかる。以下、各測定項目について考察を行うこととする。

##### (1) 重錘衝撃力波形

重錘衝撃力波形は、いずれの場合も載荷速度が  $V = 1$  m/sec の場合に、15 msec 程度の間には3波の独立した大きな波形が発生している。載荷速度の増大とともに継続時間が延び、載荷速度  $V = 7$  m/sec の場合の荷重の継続時間は 40 msec 程度となっている。

##### (2) 全支点力波形

全支点力波形に関しては、いずれの梁に対しても載荷初期に主波動が発生し、その後除荷とともに大きく減衰している。主波動の継続時間は載荷速度の増大とともに延びていることがわかる。

表-4には概略的な全支点反力の主波動継続時間を一覧にして示している。載荷速度が  $V = 1 \text{ m/sec}$  の場合には緊張率、鋼材量等によらず4試験体とも類似の値を示していることより、いずれの梁も弾性状態の応答を示しているものと考えられる。

その後、P-1.0-3, P-0.5-6, P-1.0-3-R1 は載荷速度  $V = 5 \text{ m/sec}$  まで類似の継続時間を示している。これより、これら3梁はこの時点まで類似の剛性を有しているものと推察される。載荷速度が  $V = 7 \text{ m/sec}$  の場合には P-1.0-3 の継続時間が最も長く、次いで P-1.0-3-R1, P-0.5-6 の順となっており、この順序で塑性の程度が進行しているものと推察される。このような結果は図-2の荷重-変位曲線の結果と符合している。すなわち、荷重-変位曲線において、衝撃力の小さい段階では3梁とも同一の剛性を有している。また、衝撃荷重の増大とともに、P-0.5-6 の剛性低下が最も小さく、P-1.0-3 のそれが最も大きいことがわかる。

P-1.0-3 と P-0.5-3 の継続時間を比較すると、載荷速度が  $V = 3, 5 \text{ m/sec}$  の場合には、P-0.5-3 の継続時間が P-1.0-3 より長く示されている。しかしながら、載荷速度が  $V = 7 \text{ m/sec}$  の場合には両者類似の継続時間を示している。これは、図-2の静載荷実験における荷重-変位曲線からも推察できるように、載荷速度が  $V = 3, 5 \text{ m/sec}$  の場合には緊張率の大きい P-1.0-3 が高い剛性を示している。一方、入力荷重が大きくなる載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  の場合には、両者の静的耐力が類似なものとなっていることより、類似の荷重変位経路を示し類似の継続時間を示したものと推察される。

(3) 載荷点変位波形

載荷点変位波形に関しては、前述の全支点反力波形と同様の性状を示している。主波動の継続時間を一覧にして示すと表-5のように示される。表-4の全支点反力波形の主波動継続時間と比較すると、弾性応答性状を示す載荷速度  $V = 1 \text{ m/sec}$  の場合には両者類似の継続時間を示している。一方、塑性の程度が進行する載荷速度  $V = 3 \text{ m/sec}$  以上の場合には、載荷速度の増大とともに載荷点変位の継続時間が支点反力のそれよりも長く示されている。これは、支点近傍部に比し載荷点近傍部の塑性化が衝撃荷重載荷によって著しく進行し曲げ剛性の低下およびエネルギー吸収が大きくなるためと考えられる。

4.2 全支点反力-載荷点変位曲線

衝撃荷重載荷によるエネルギー吸収量を検討するために、全支点反力と載荷点変位を用いた衝撃荷重載荷時のヒステリシスループを求めた。図-5に P-1.0-3 の場合の例を示す。本来入力エネルギーを議論する場合には、

表-4 全支点反力の主波動継続時間 ( msec )

試験体名	載荷速度			
	1 m/sec	3 m/sec	5 m/sec	7 m/sec
P-1.0-3	14.0	22.8	34.0	51.0
P-0.5-3	15.7	31.4	40.0	50.0
P-0.5-6	14.0	20.0	28.6	32.9
P-1.0-3-R1	14.3	21.4	30.0	44.2

表-5 載荷点変位の主波動継続時間 ( msec )

試験体名	載荷速度			
	1 m/sec	3 m/sec	5 m/sec	7 m/sec
P-1.0-3	14.3	28.6	45.7	74.3
P-0.5-3	21.4	41.4	48.6	64.3
P-0.5-6	12.9	27.1	37.1	47.1
P-1.0-3-R1	17.1	28.6	38.6	71.4

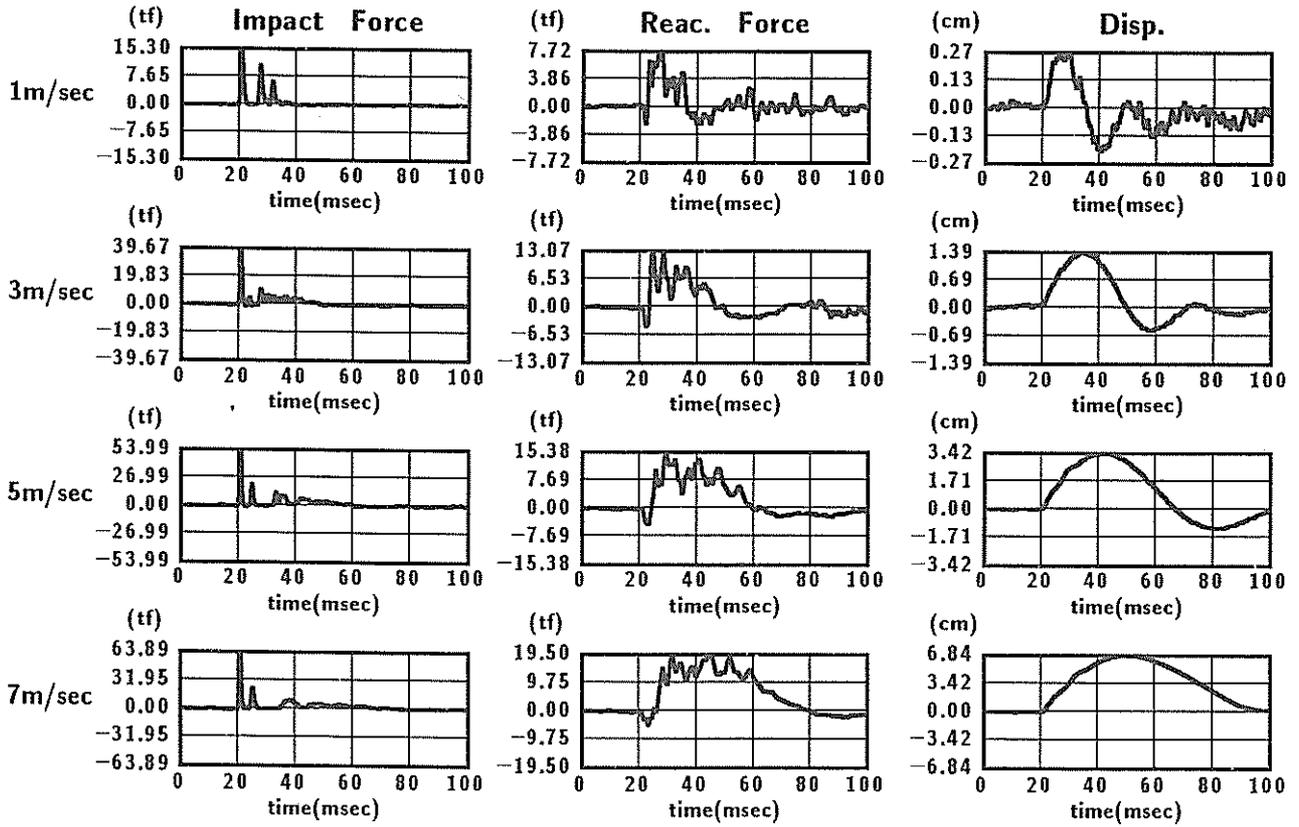
荷重は重錘から得られた波形を用いなければならない。しかしながら、1) 重錘衝撃力は重錘と梁の相互作用状態で発生し、かつ重錘中を伝播する弾性波動を含む高周波で物理的に複雑な波形であること。2) 図-4に示されているように、全支点反力波形と変位波形は継続時間が多少異なるものの類似なものとなっており、静載荷時の考え方の延長上で議論が可能であると判断されることより、本研究では入力荷重として全支点反力波形を用いることとした。また、同一の載荷速度におけるエネルギー吸収量を用いて梁の健全性を論ずる場合、エネルギー吸収量の少ない梁ほど健全であることに留意する必要がある。

図-5より、載荷速度が  $V = 1, 2 \text{ m/sec}$  と小さい場合にはエネルギー吸収もほとんどなく、ほぼ弾性状態であることがわかる。その後、載荷速度の増大とともに、変位も大きくかつエネルギー吸収量も大きくなっていく様子が示されている。

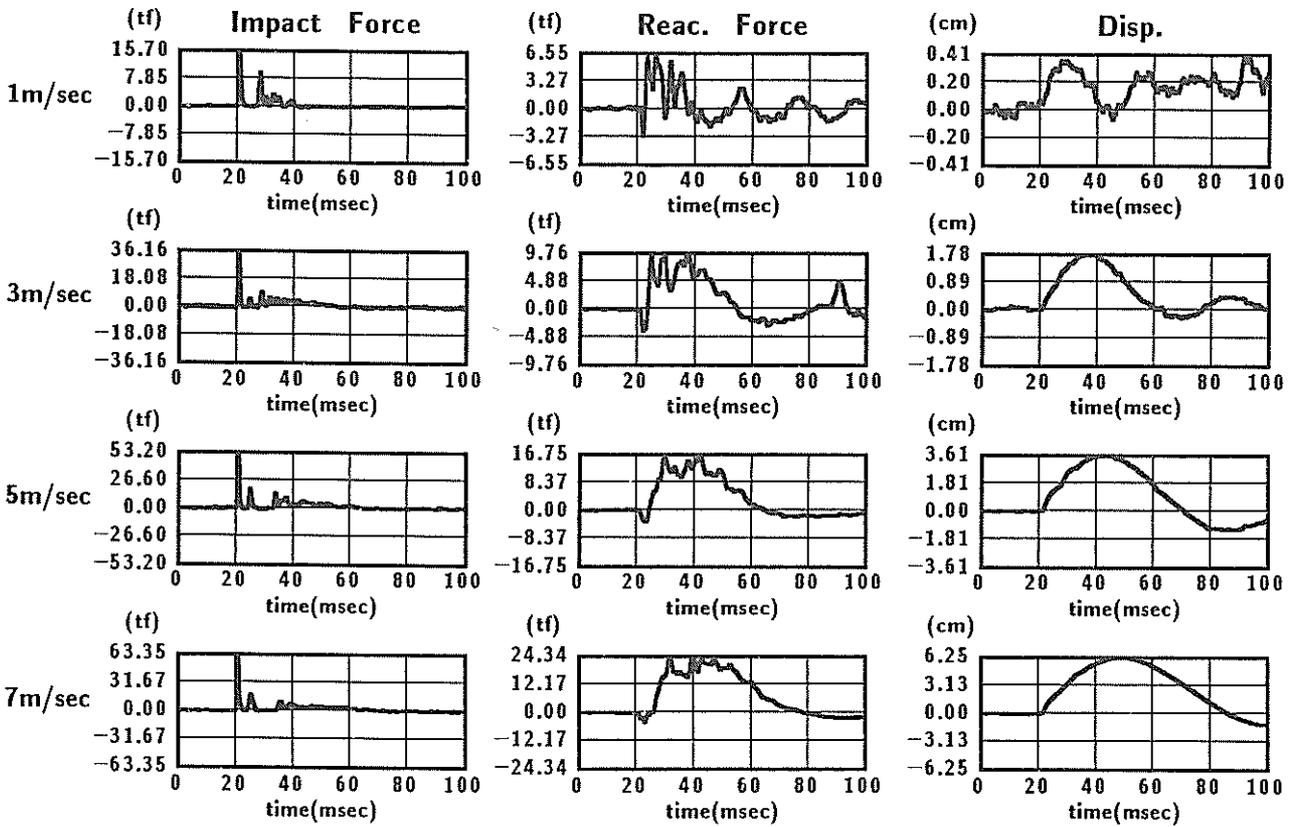
図-6には載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  における各梁の全支点反力-載荷点変位曲線を示している。P-1.0-3, P-0.5-3, P-1.0-3-R1 のエネルギー吸収量は、他に比較して大きく示されている。また、P-1.0-3-R2は他と比較して複雑なヒステリシスループを示している。

表-6には正載荷状態(第一象限)のエネルギー吸収量と、静載荷実験におけるエネルギー吸収率(スパン長が3m)および両者の比を示している。

各梁の載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  におけるエネルギー吸収量一覧において、P-0.5-6のエネルギー吸収量が最も

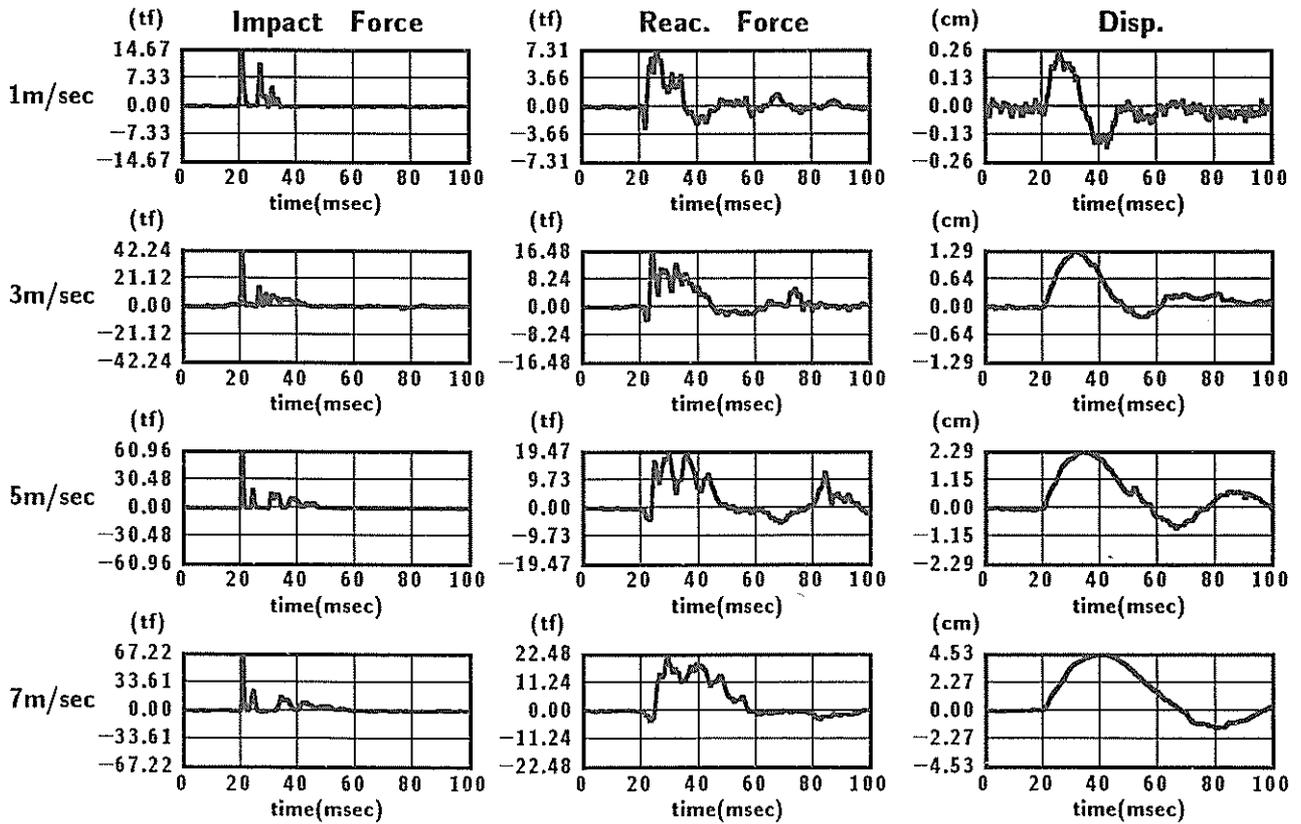


(a) P-1.0-3 の場合

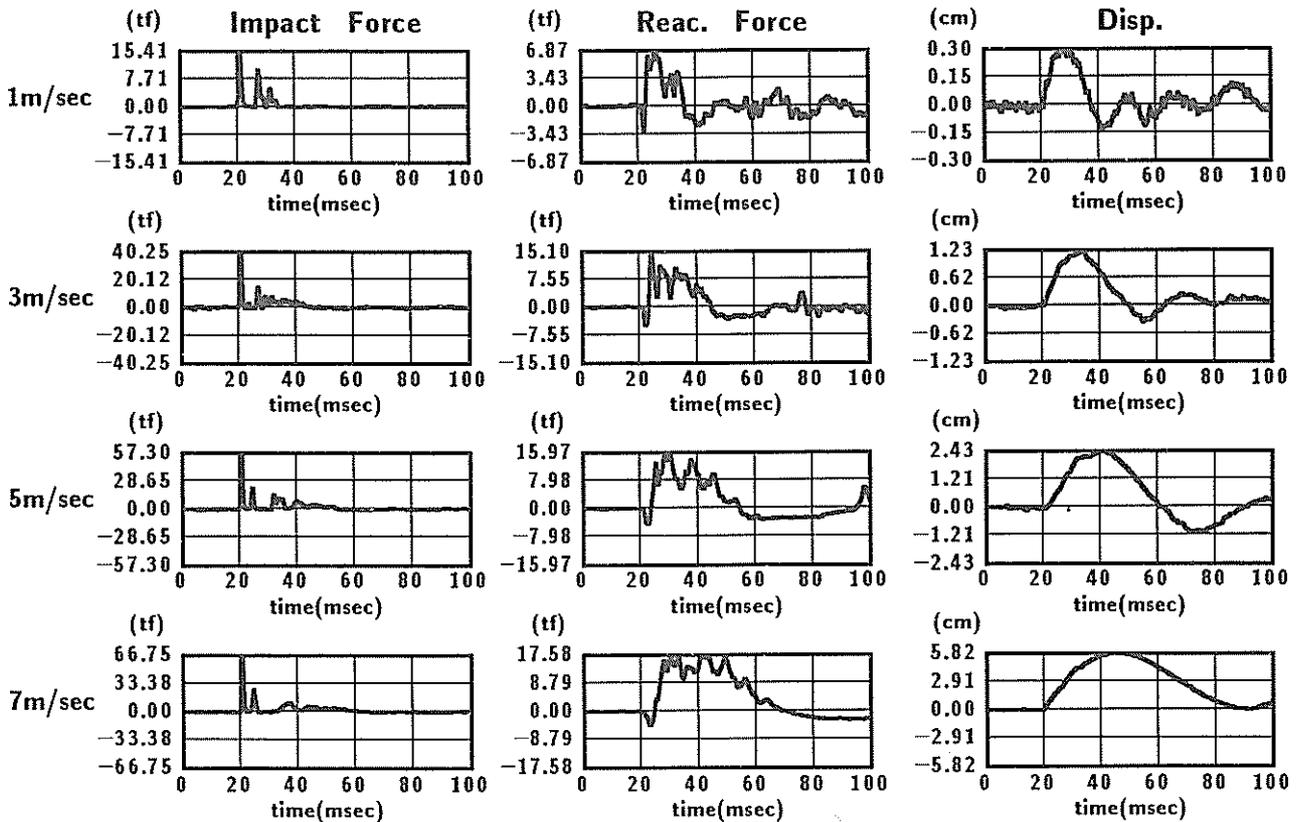


(b) P-0.5-3 の場合

図-4 重錘衝撃力波形, 全支点反力, 載荷点変位波形図



(c) P-0.5-6 の場合



(d) P-1.0-3-R1 の場合

図-4 (続き) 重錘衝撃力波形, 全支点反力, 載荷点変位波形図

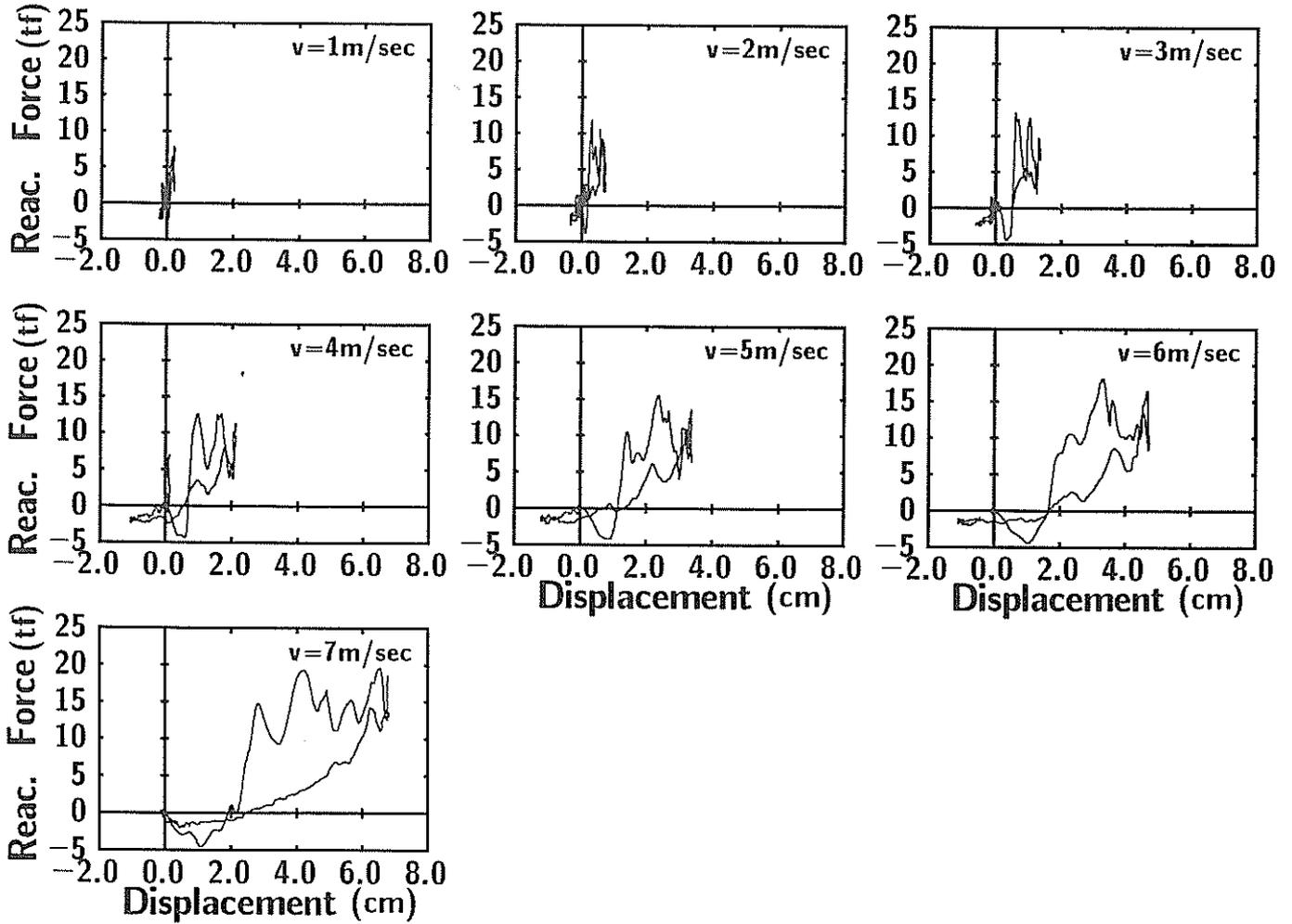


図-5 全支点反力-載荷点変位曲線の一例 ( P-1.0-3 の場合)

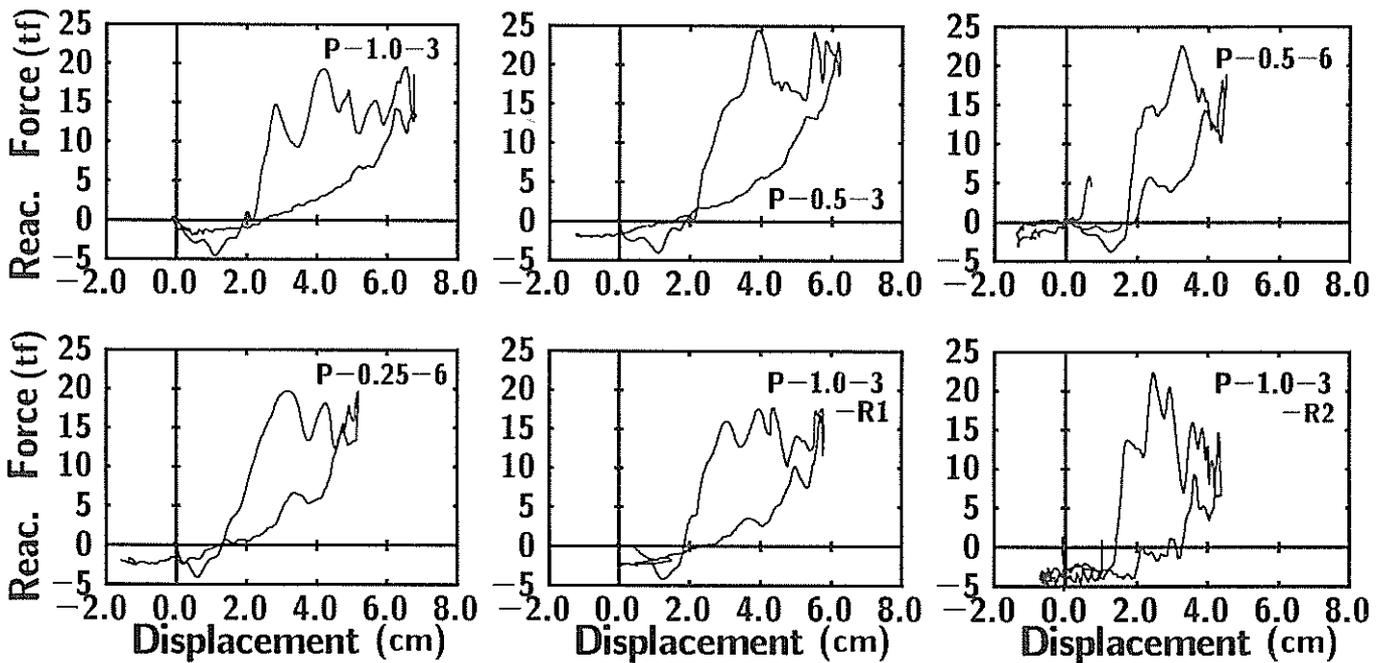


図-6 衝突速度  $V = 7\text{ m/sec}$  載荷時の全支点反力-載荷点変位曲線

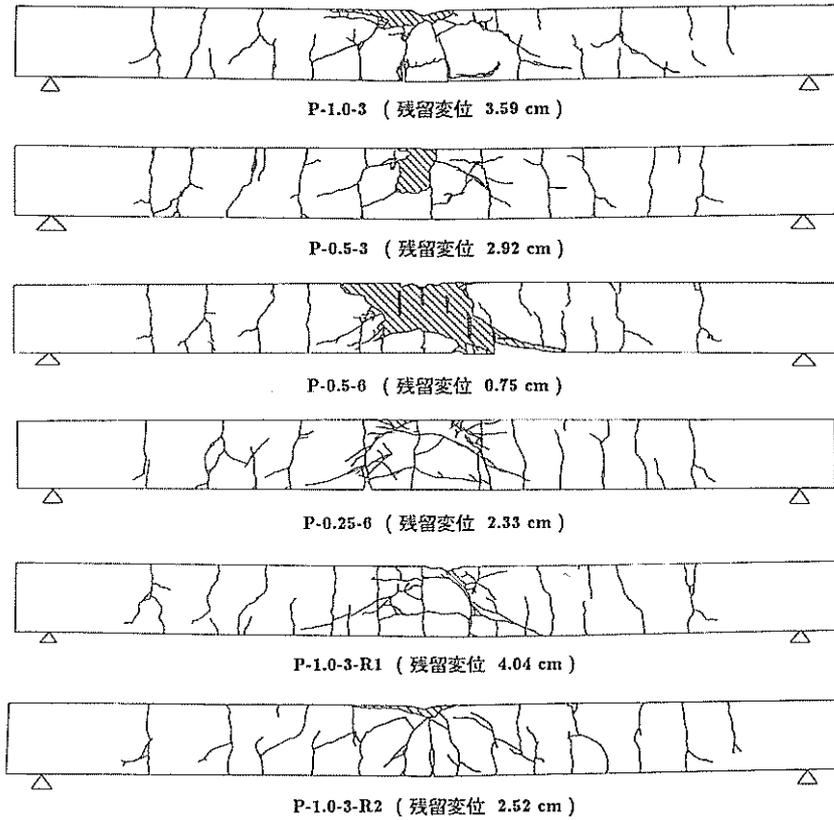


図-7 衝撃荷重実験終了後の各 PRC 梁のひびわれ状況図

表-6 載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  時のエネルギー吸収量

試験体名	① $V=7\text{m/sec}$ 時のエネルギー吸収量 (tf·cm)	② 静的載荷時のエネルギー吸収量 (tf·cm)	① / ②
P-1.0-3	33.55	31.05	1.08
P-0.5-3	33.53	46.24	0.73
P-0.5-6	20.48	89.05	0.23
P-0.25-6	28.28	59.54	0.47
P-1.0-3-R1	30.18	44.65	0.68
P-1.0-3-R2	28.60	66.95	0.43

小さい。これは、全支点反力あるいは載荷点変位の主波動継続時間と同様塑性化の程度が最も小さいことに対応しており、最も健全であることを示しているものと判断される。P-0.25-6 と P-0.5-6 において、両者の PC 鋼材本数が等しいものの前者のエネルギー吸収量が後者より大きい。これは、図-2、表-3 の静載荷実験結果からも明らかのように、 $P_{cr}$  後の接線剛性が両者等しいものの、前者の  $P_{cr}$  や  $P_u$  が後者より小さく載荷点変位が大きくなるためと考えられる。また、P-1.0-3、P-1.0-3-R1、-R2 の場合は、PC 鋼材本数、緊張率が等しく、ひびわれ制

御用の異形鉄筋量のみが異なる場合であるが、異形鉄筋量に応じて吸収エネルギー量が小さく示されている。この結果も静載荷実験結果に示されているように、異形鉄筋量の増大とともに  $P_{cr}$  後の接線剛性や  $P_u$  が大きくなることに対応しているものと考えられる。

次に、静載荷実験結果に対するエネルギー吸収比率について考察する。表より、P-1.0-3 は既に静的エネルギー吸収量と同程度に達していることがわかる。それに対し、P-0.5-3 は 70% 前後で緊張率低減による効果が示されている。P-1.0-3-R1、-R2 は異形鉄筋量に対応してエネルギー吸収比率が低下しており、異形鉄筋量のエネルギー比率低減に関する効果が明確に示されている。本研究では、P-0.5-6 の梁が最もエネルギー吸収比率が小さく、耐衝撃性に優れていることがわかる。

以上、繰り返し衝撃載荷実験結果より、ひびわれ制御のため下端筋に異形鉄筋を配置して PRC 梁にすることや、PC 鋼材の緊張率を 50% 程度に小さくすること、あるいは PC 鋼材数を増やすことにより、現状の設計手法に基づいた PC 梁よりも、耐衝撃性が向上することが明らかになった。

#### 4.3 衝撃荷重載荷後のひびわれ状況

図-7 には載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  までの繰り返し荷重

載荷実験終了後の各梁のひびわれ図および最大残留変位値を示している。静載荷時に発生するひびわれ(図-3)は, 前述のように載荷点部を中心に最大でもスパン長の1/2程度の領域に分布している。一方, 重錘落下衝撃実験の場合には, いずれの梁に関してもひびわれはほぼスパン全体かつ上下に貫通した状態で分布していることがわかる。これは, 繰り返し荷重載荷によって塑性化が支点方向に進展すると同時に, リバウンドによって梁が負載荷状態になることに起因しているものと考えられる。

P-1.0-3, P-0.5-3 を比較すると, P-1.0-3 の場合には中央部下端に幅の広い曲げひびわれが発生し, 角折れに近い状態になっている。一方, P-0.5-3 の場合は, 載荷点近傍部のかぶりコンクリートが剝離しているものの, 中央部下端のひびわれ幅も小さく正負載荷状態の曲げせん断ひびわれが発生する程度である。

P-0.5-6 の場合には載荷点部の押し抜け型のせん断ひび割れとともに, 側面および下端のかぶりコンクリートが剝離している。それ以外は, P-0.5-3 と同様のひびわれ分布性状を示している。中央部コンクリートの大きな剝離は, 静載荷実験結果からも明らかなように, 耐力や曲げ剛性が大きいため見かけ状の衝撃力が大きく鉄筋によって拘束されていないコンクリート部が割裂状態になったため発生したものと考えられる。それは, 残留変位が0.75 cm と最も小さいことから類推される。

P-0.25-6 は全緊張力がP-0.3-5 と等しい場合であるが, 載荷点部の押し抜けせん断ひびわれがより顕著に示されている。また, 残留変形量も0.6 cm 程度小さいことより, 静載荷時同様 PC 鋼材量が多い場合には曲げ剛性が大きく評価されることが類推される。

P-1.0-3, P-1.0-3-R1, -R2 を比較すると, 静載荷時同様ひびわれ制御鉄筋量に対応して載荷点近傍部の損傷の程度も小さくかつひびわれの分散性も改善されていることがわかる。

## 5. まとめ

耐衝撃性に優れた PC ( PRC ) 覆工の部材設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として, PC 鋼材の本数, 緊張率, ひびわれ制御のための下端異形鉄筋量を変化させた場合の静的耐荷性状や耐衝撃性, エネルギー吸収量に着目して6種類の矩形 PRC 梁を用いた実験を行った。本研究で得られた結果を要約すると: 静載荷実験結果より,

(1) PC鋼材量が同一の場合には, 緊張率を50%程度に低減させることにより, 静的耐力を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を50%程度増加させることが

できる。

- (2) 梁下端に異形鉄筋を配置して PRC 梁とすることにより, エネルギー吸収能を向上させることができる。
  - (3) PC鋼材の全緊張力を一定とし, 緊張率を50%, 鋼材量を2倍にすることにより, 静的耐力は1.7倍, エネルギー吸収量は3倍弱に向上する。
- 衝撃荷重載荷実験結果より,
- (4) 重錘衝撃力, 全支点反力, 載荷点変位はPC鋼材の緊張率や本数, 異形鉄筋量に関わらずほぼ類似の応答波形を示す。
  - (5) 全支点反力や載荷点変位波形の継続時間は, 梁の剛性の低下に対応しているようである。また, 載荷点部の塑性化の程度の進行により, 載荷点変位の継続時間は全支点反力のそれより延びる傾向にある。
  - (6) ひびわれ制御のために異形鉄筋を配置し PRC 梁とすることや, PC 鋼材の緊張率を50%程度に小さくすることあるいはPC鋼材量を増やすことにより, 衝撃荷重載荷時のエネルギー吸収量や静的なエネルギー吸収量に対するエネルギー吸収比率を低下させ, 耐衝撃性を向上させることが可能である。

謝 辞: 本実験を行うにあたり, 室蘭工業大学建設システム工学科大学院生の亀石 暁君(現, 北海道開発コンサルタント(株)勤務)と吉川 卓君に多大なる御支援を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 今野久志, 佐藤弘史, 長尾彰洋: PC 鋼材量および鉄筋の割合を多くした PRC 梁の衝撃実験について, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, 1-B, 1994, pp.1620-1621.
- (2) 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修: 三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, Vol.41A, 1993.6, pp. 230-235.
- (3) 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化, 構造工学論文集, Vol. 42A, 1996.3, pp. 1337-1346.
- (4) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一: 三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol. 42A, 1996.3, pp. 1347-1356.
- (5) 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一: PRC 梁の耐衝撃性に関する基礎的研究, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, Vol. 3, 1996.6, pp. 301-304.